

ARAÇÜSTÜ HİDROLİK İŞ PLATFORMLARININ SEPET DENGELEME KONTROLÜ

¹Mehmet SEZER, ²Mete KALYONCU

^{1,2}Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, KONYA
¹mhmts2011@hotmail.com, ²mkalyoncu@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 06.05.2014 ; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.06.2014)

ÖZET: Bu çalışmada mobil hidrolik insan platformunun sepet uzvunun her durumunda yatayla paralel olmasının sağlanması konusunda çalışılmıştır. Mobil hidrolik insan platformunu temsil edebilecek gerçekçi modeli oluşturularak, sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen kontrolcü ile sistemdeki sepeti uzvunun yatayla paralel olarak durmasının aktif kontrolü sağlanmıştır. Geliştirilen kontrolcü PID (Oransal, Türevsel ve İntegral) tabanlıdır. Geliştirilen kontrol sisteminin performansının değerlendirilmesi amacıyla bilgisayar simülasyonları yapılmıştır. Bilgisayar simülasyonları MATLAB/Simulink yazılımı ile yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mobil hidrolik platform, İnsan platform, Sepet dengeleme

Cage Levelling Control of Truck-Mounted Hydraulic Aerial Work Platforms

ABSTRACT: In this study, cage levelling control of truck-mounted hydraulic aerial work platforms in each case the platform has been studied in ensuring that parallel to the horizontal. The mathematical model belonging to the system was derived by making realistic model which can represent truck-mounted hydraulic aerial work platforms. With developed controller, cage's active control was supplied for standing parallel to horizontal. Developed controller is based on PID (proportional, integral and derivative). Computer simulations were made to evaluate the developed control system performance. Computer simulations were derived by using MATLAB/Simulink software.

Keywords: Aerial working platform, Human platform, Cage levelling,

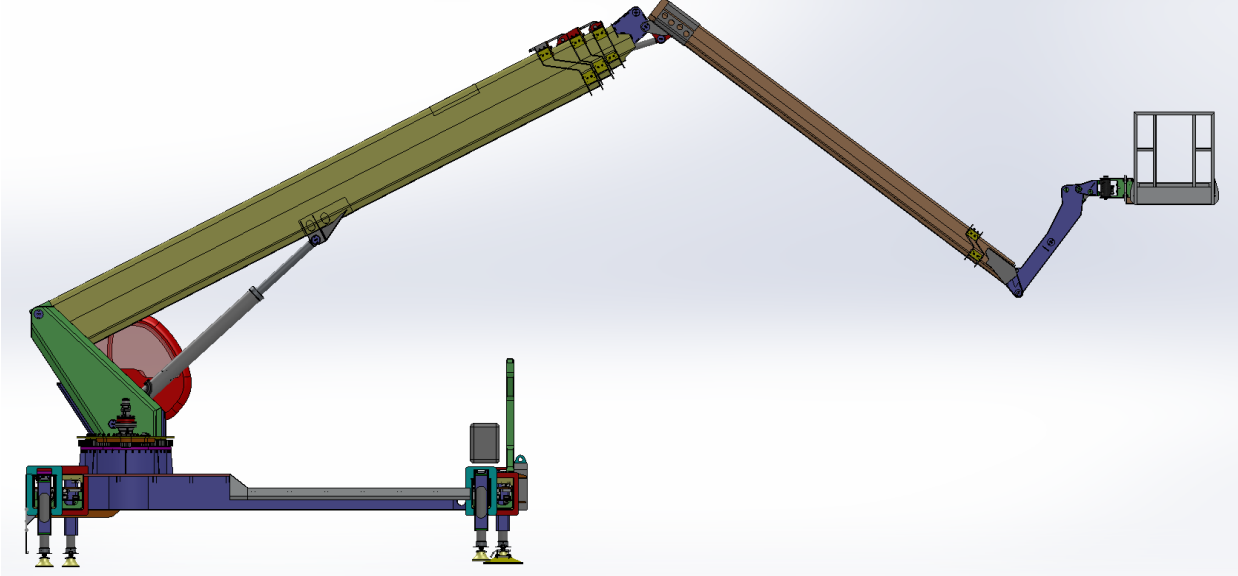
GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mobil hidrolik platformlar insanların ulaşamayacağı yerlere onları ulaştırma amaçlı tasarlanmıştır (Hu ve diğ., 2010). Mobil vinçlerde insan kaldırmak kanunen yasaklanmasından sonra sanayi sektöründe yeni bir iş dalı oluşmuş, Mobil Hidrolik insan platformu adı verilen makinalar üretilmeye başlanmıştır. İlk başlarda meyve ağaçlarından meyve toplamak amacı ile yapılmış olan bu sistemler makaslı hidrolik platform olarak üretilmişlerdir fakat daha sonraları daha yükseklerle erişim söz konusu olduğunda 1944 yılında Mobil Hidrolik insan platformunu üretmişlerdir. Ülkemizde ise bu işlemi mobil vinçlerin ucuna insan sepeti kullanılarak mekanik bir sistemle uygulanmıştır. Mobil hidrolik insan platformlarının kullanım alanları günümüzde her geçen gün artmaktadır. Mobil hidrolik insan platformları, yüksek binaların dış yüzeylerinin temizliğinde, çatı sistemlerinin kurulması, elektrik direklerinin elektrik bağlantılarının yapılmasında yüksek binaların su borularının döşenmesi tamirati, itfaiye araçlarında yangın söndürme amacı gibi insanların normal şartlarda ulaşamayacağı yerlere ulaşmasında kullanılır.

Mobil hidrolik insan platformu 3 tip olarak sınıflandırılabilir.

- Teleskopik,
- Mafsallı,
- Katlamalı,
- Kompozit yapıdır (Ming Ge. ve diğ., 2011).

Bu çalışmada ele alınan teleskopik ve katlamalı tip insan platformudur ve Şekil 1 de görülmektedir.



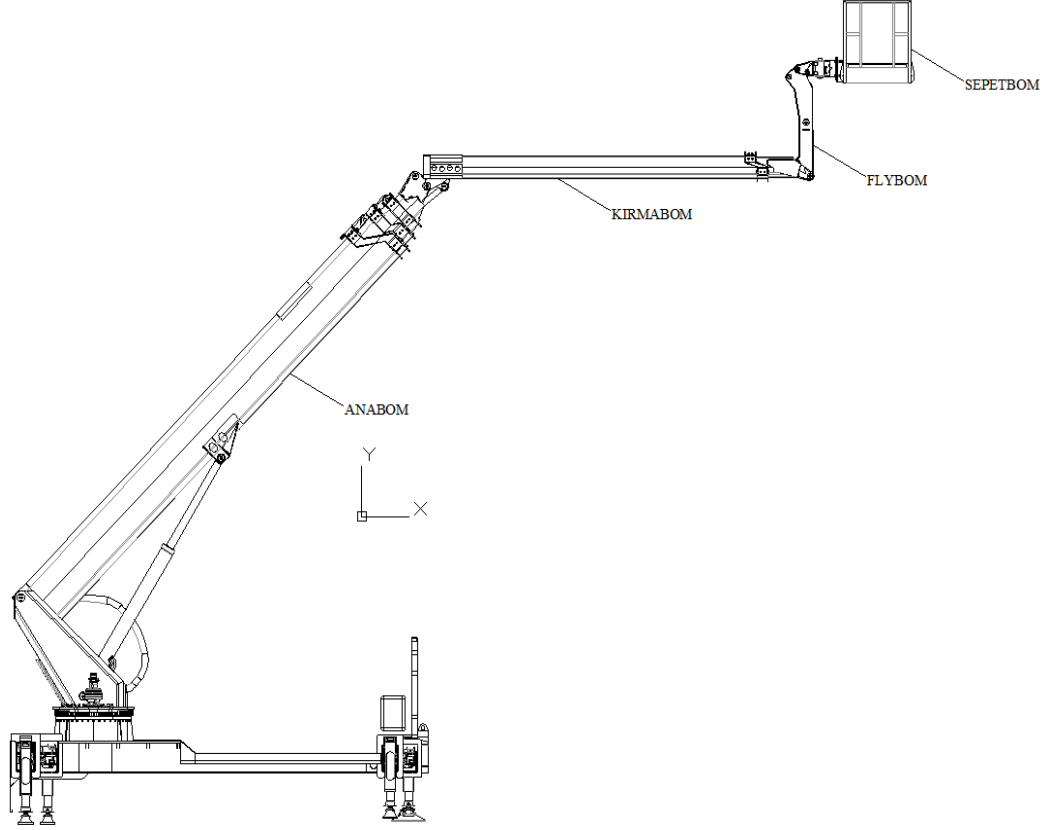
Şekil 1. Mobil Hidrolik İnsan Platformu (Mobile hydraulic aerial work platforms)

Oluşan bu iş dalının sorunlarından biri de insan sepeti uzvunun yatayla paralel olarak tutulamamasıdır. Geçmişte bu sorun tam olarak çözülemediği için birçok iş kazası meydana gelmiş ve can ve mal kayıpları yaşanmıştır (Yuan Q. Ve ark, 2009). Bu konulara ilişkin önceki araştırmalar sınırlıdır. Ancak son zamanlarda bu konu üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Doğrusal olmayan geniş bir hareketin kontrolünü sağlamak için düzlemsel simülasyonlar yapılmaya başlanmıştır. Yapısal olmayan ortamlarda, mobil manipülatör büyük hareketlerinin kontrolü için geliştirilmiştir (Hootmans ve diğ. 1999). Mobil hidrolik insan platformunun insan sepetinin yatayla paralel olarak tutulabilmesi için çeşitli mekanik ve hidrolik projeler tasarlanmıştır. Fakat bu gelişmeler çoğu zaman operatöre bağlı olarak yapıldığı için tam anlamıyla gerçekleşmemiştir. Bu yüzden gelişen teknoloji ile birlikte mekanik sistemleri yazılımla birleştirip çözüm yoluna gidilmeye başlanmış ve çözüm aranmıştır.

Mobil Hidrolik İnsan Platformunun insan sepetinin dengesine tahrik edilen her uzvun hareketi etki etmektedir. Mobil Hidrolik İnsan Platformunun insan sepetinin dengelenmesini yapabilmek için Mobil Hidrolik İnsan Platformunun çalışma şekli, çalışma kısıtları, uzuvlarını, uzuvların hareketlerini ve parametrelerini sağlayan tahrik sistemlerinin iyi analiz edilmiş olması gerekmektedir. Belirlenen kısıtlar ve çalışma kapasitesine göre Mobil Hidrolik İnsan Platformu sisteminin fiziksel modeli ve hareket dinamikleri elde edilmiştir. Anabom, kırmabom, flybom ve insan sepetinden oluşan sistemimizde her uzuv birbirinden bağımsız dört hidrolik silindir ile tahrik edilir. Bu silindir kuvveti dönme merkezinde tork oluşturur. Oluşan bu tork sayesinde uzuvların hareket etmeleri sağlanır. Uzuvların her birinin hareketi insan sepeti uzvunun diğer uzuvların hareketlerine göre yatayla paralel olarak kendi kendini dengeleyebileceği öngörülerek konum kontrolleri yapılmıştır.

Serial Manipülatörlerinin kontrol teorisi temel alınarak oluşturulmuş olan Mobil Hidrolik İş Platformunun sepet uzvunun kontrol mekanizması benzer mantıkla çalışacaktır. Bu kontrol teorisinin sağlıklı şekilde belirlenebilmesi için fiziksel olan sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sistemde her uzvun hareketi birbirinden bağımsız 4 silindir ile tahrik edilmektedir. Sistemin uzuvlarının

hareketleri sensörler tarafından matematiksel olarak ifade edilip ve model için bir giriş olacak şekilde düzenlenmiştir. Oluşturulan sistemde sepet uzvuna diğer uzuvların hareketleri etki ettiği için sepet uzvunun için özel sensör tasarlanmıştır. Tasarlanan sensörden alınan veriler sisteme girdi olarak verilmiştir.



Şekil 2. Mobil Hidrolik İnsan Platformu ve Uzuvarları (Mobile hydraulic aerial work platforms and links)

Çizelge 1. Anabom uzvunun parametreleri (Anabom link parameters)

L_1	Anabom uzvunun boyu	9.21323 m
l_1	Anabom uzvunun ağırlık merkezinin dönme merkezine olan uzaklığı	4.242 m
m_1	Anabom uzvunun kütlesi	4144.62 kg
I_{z1}	Anabom uzvunun kütle atalet momenti	22604.54402467 kg.m ²

Çizelge 2. Kirmabom uzvunun parametreleri (Kirmabom link parameters)

L_2	Kirmabom uzvunun boyu	6.3305 m
l_2	Kirmabom uzvunun ağırlık merkezinin dönme merkezine olan uzaklığı	2.6357 m
m_2	Kirmabom uzvunun kütlesi	825.67 kg
I_{z2}	Kirmabom uzvunun kütle atalet momenti	21029.02731951 kg.m ²

Çizelge 3. Flybom uzvunun parametreleri (Flybom link parameters)

L_3	Flybom uzvunun boyu	1.695 m
l_3	Flybom uzvunun ağırlık merkezinin dönme merkezine olan uzaklığı	0.85744 m
m_3	Flybom uzvunun kütlesi	115.404 kg
I_{z3}	Flybom uzvunun kütle atalet momenti	138.17579645 kg.m ²

Çizelge 4. Sepetbom uzvunun parametreleri(*Sepetbom link parameters*)

l_4	Sepetbom uzvunun ağırlık merkezinin dönme merkezine olan uzaklığı	1.22436 m
m_4	Sepetbom uzvunun kütlesi	295 kg
I_{z4}	Sepetbom uzvunun kütle atalet momenti	2868.72966096 kg.m ²

SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİNİN ELDE EDİLiŞİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM)

Sistemin doğrusal olmayan hareket denklemleri Langrange hareket metoduyla elde edilmiştir. Lagrange “L” hareket denklemleri, sistemin potansiyel enerjisi “V” ve kinetik enerjisi “T” arasındaki fark olarak tanımlanır. Sistemin kinetik enerjisi aşağıda verilmiştir. Kinetik enerji formülasyonunda görüldüğü gibi uzuvların koordinatlarının karelerine ihtiyacımız vardır (Murray ve diğ. 1994)

Sistemin kinetik enerjisi;

$$T = \frac{1}{2}.m_1.(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2}.m_2.(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2}.m_3.(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2}.m_4.(\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2) + \left(\frac{1}{2}.I_{z1}.\dot{\theta}_1^2\right) + \left(\frac{1}{2}.I_{z1}.\dot{\theta}_1^2\right) + \left(\frac{1}{2}.I_{z2}.\dot{(\theta_1+\theta_2)}^2\right) + \left(\frac{1}{2}.I_{z3}.\dot{(\theta_3-\theta_1-\theta_2)}^2\right) + \left(\frac{1}{2}.I_{z4}.\dot{(\theta_4-\theta_3+\theta_1+\theta_2)}^2\right) \quad (1)$$

Sistemin potansiyel enerjisi;

$$V = (m_1.g.l_1.\sin\theta_1 + m_2.g.((L_1.\sin\theta_1) + (l_2.\sin(\theta_1-\theta_2))) + m_3.g.((L_1.\sin\theta_1) + (L_2.\sin(\theta_1-\theta_2)) - (l_3.\sin(\theta_3-\theta_1+\theta_2))) + m_4.g.((L_1.\sin\theta_1) + (L_2.\sin(\theta_1-\theta_2)) - (L_3.\sin(\theta_3-\theta_1+\theta_2)) + (l_4.\sin(\theta_4-\theta_3+\theta_1-\theta_2))) \quad (2)$$

Anabom koordinatları

$$x_1 = l_1.\cos\theta_1 \quad (3)$$

$$y_1 = l_1.\sin\theta_1 \quad (4)$$

Kırmabom koordinatları

$$x_2 = (L_1.\cos\theta_1) + (l_2.\cos(\theta_1-\theta_2)) \quad (5)$$

$$y_2 = (L_1.\sin\theta_1) + (l_2.\sin(\theta_1-\theta_2)) \quad (6)$$

Flybom koordinatları

$$x_3 = (L_1.\cos\theta_1) + (L_2.\cos(\theta_1-\theta_2)) + (l_3.\cos(\theta_3-\theta_1+\theta_2)) \quad (7)$$

$$y_3 = (L_1.\sin\theta_1) + (L_2.\sin(\theta_1-\theta_2)) - (l_3.\sin(\theta_3-\theta_1+\theta_2)) \quad (8)$$

Sepetbom koordinatları

$$x_4 = (L_1.\cos\theta_1) + (L_2.\cos(\theta_1-\theta_2)) + (L_3.\cos(\theta_3-\theta_1+\theta_2)) + (l_4.\cos(\theta_4-\theta_3+\theta_1-\theta_2)) \quad (9)$$

$$y_4 = (L_1.\sin\theta_1) + (L_2.\sin(\theta_1-\theta_2)) - (L_3.\sin(\theta_3-\theta_1+\theta_2)) + (l_4.\sin(\theta_4-\theta_3+\theta_1-\theta_2)) \quad (10)$$

Bulunan Lagrange hareket denklemleri aşağıdaki formülasyon yardımıyla bulunmuştur ve sistemin matematiksel modeli hazırlanmıştır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = T_1 \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = T_2 \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_3} = T_3 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_4} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_4} = T_4 \quad (14)$$

(11, 12, 13, 14) nolu denklemlere gerekli işlemler yapılarak sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. Sistemin sahip olduğu serbestlik derecesi 4 olduğu için dört ayrı hareket denklemi bulunmuştur. 4 uzvun tahrik mekanizması silindir olduğu için denklemlerin sonucu torka eşitlenmiştir.

İncelenen sistemin çalışma kısıtları ve çalışma kapasiteleri belirlenmiştir. Çizelge 5. de belirtildiği gibi uzuvların hareket kapasiteleri gösterilmiştir.

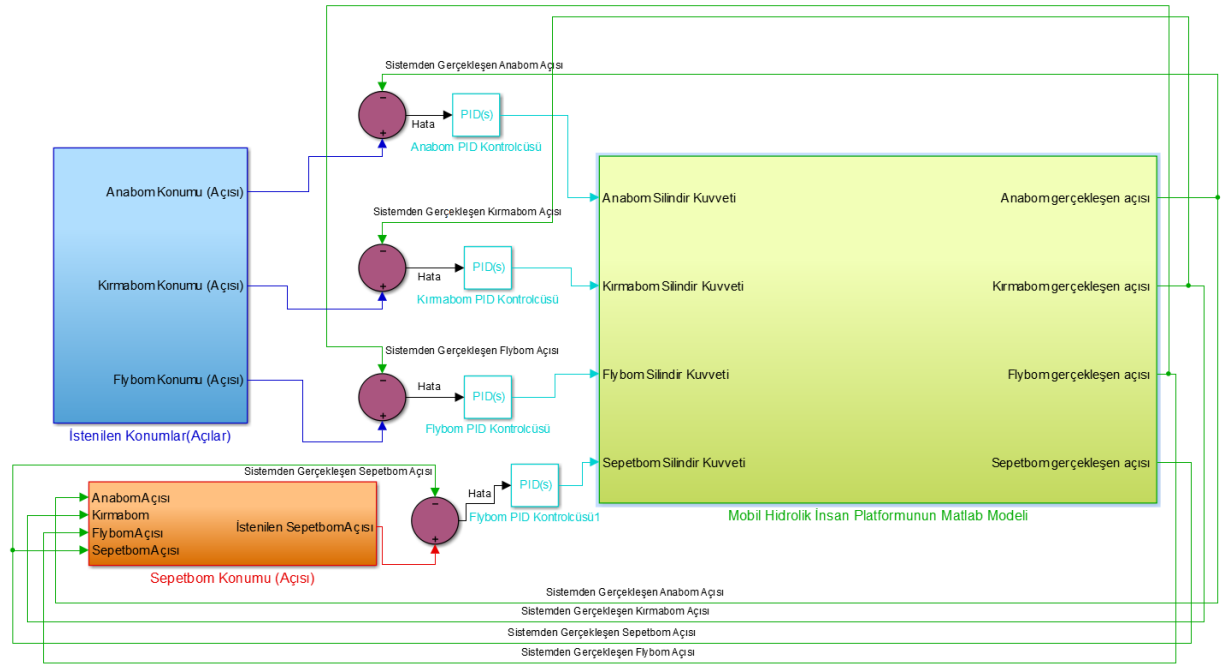
Çizelge 5. Çalışma kapasiteleri (Working capacity)

Açılar	Çalışma Aralığı
θ_1	$0^\circ < \theta_1 < 85^\circ$
θ_2	$0^\circ < \theta_2 < 180^\circ$
θ_3	$0^\circ < \theta_3 < 90^\circ$
θ_4	$0^\circ < \theta_4 < 90^\circ$

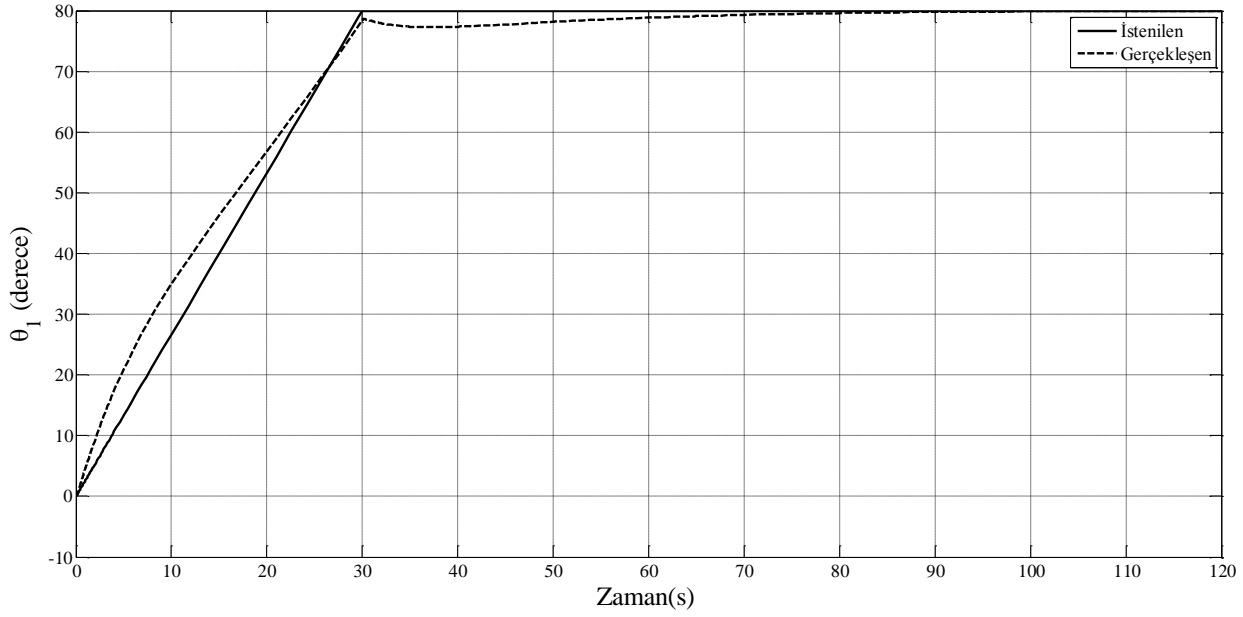
Ele alınan sistemin sepet uzvunun çalışma anındaki kısıtı yatayla $-6^\circ < \theta_4 < 6^\circ$ arasında olduğundan dolayı toplam 12° dir. Sepet uzvunun yatayla paralelliği 6° den fazla olursa sistem otomatik olarak kitlenip çalışmayı durdurur. Sepetin yatayla paralel olarak kalması için sepet uzvunun yatayla yaptığı açının 2° den fazla bozulmuş olması gerekmektedir. Eğer çalışma anında yatayla paralelliği 2° den fazla bozulmuş olursa tasarlanmış olan PID kontrolcü devreye girip sepetin yatayla paralel olmasını sağlamaktadır.

SİSTEMİN PID KONTROLÜ İLE MODELLENMESİ (MODELİNG of the SYSTEM with PID CONTROLLER)

Sistemin Matlab/Simulink ortamında modeli Şekil 3 de görülmektedir. Sisteme istenilen giriş sinyalleri yollanmış Gerçekleşen sinyal ile farkını alıp PID kontrolcüye sokulup sisteme tekrar girdi olarak verilmiştir. Bu döngü istenilen uzuvlar dengelenene kadar devam eder. Sistemde dört ayrı PID kontrolör uygulanıp her uzvun hareketi kontrol edilmiştir.

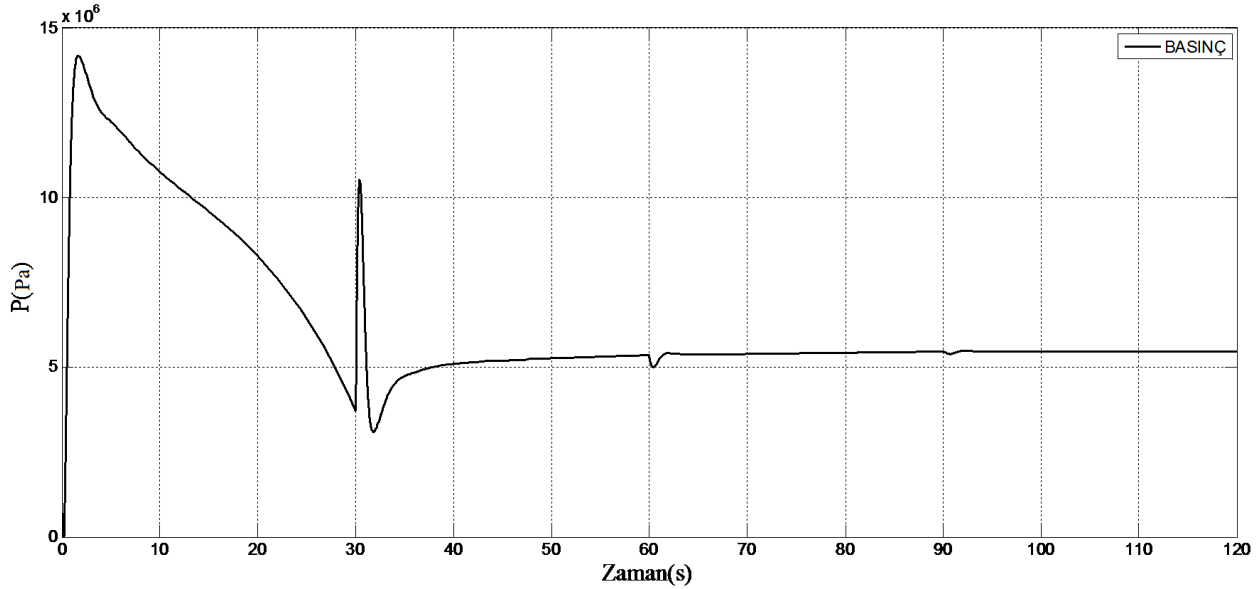


Şekil 3. Sistemin Matlab/Simulink Bloklarıyla Modellenmesi (Modelling of system with blok in Matlab/Simulink)



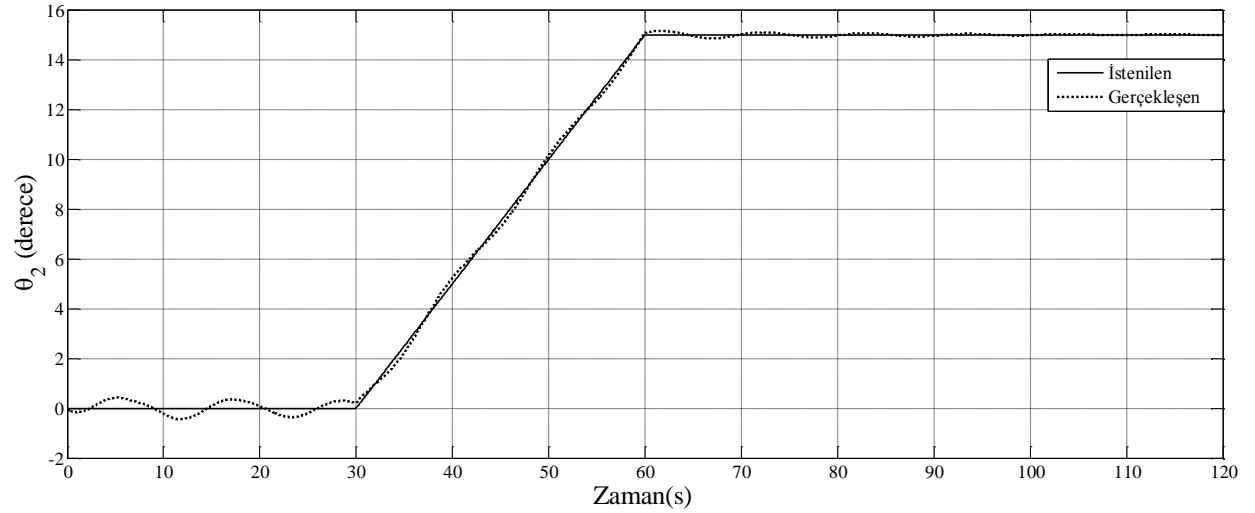
Şekil 4. θ_1 Anabom kalkma açısının PID kontrolcü uygulanarak karşılaştırılması
(Comparison of Anabom lifting angle analyzed using the PID Controller)

Ele alınan sistemde ilk olarak anabom uzvu hareket ettirilmiştir. Anabom uzvundan istenilen hareket sistemde Anabom Giriş Sinyali olarak tanımlanmış ve Şekil 4 te gösterilmiştir. Bu giriş sinyalinin sistemde kontrolü PID kontrolcü ile sağlanmıştır. Sistemdeki kontrolcünden alınan çıkış değeri Şekil 4 te görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi sonuçlar birbirinden çok farklı olmamakla beraber istenilen değere yakın olarak çıkması sağlanmıştır.



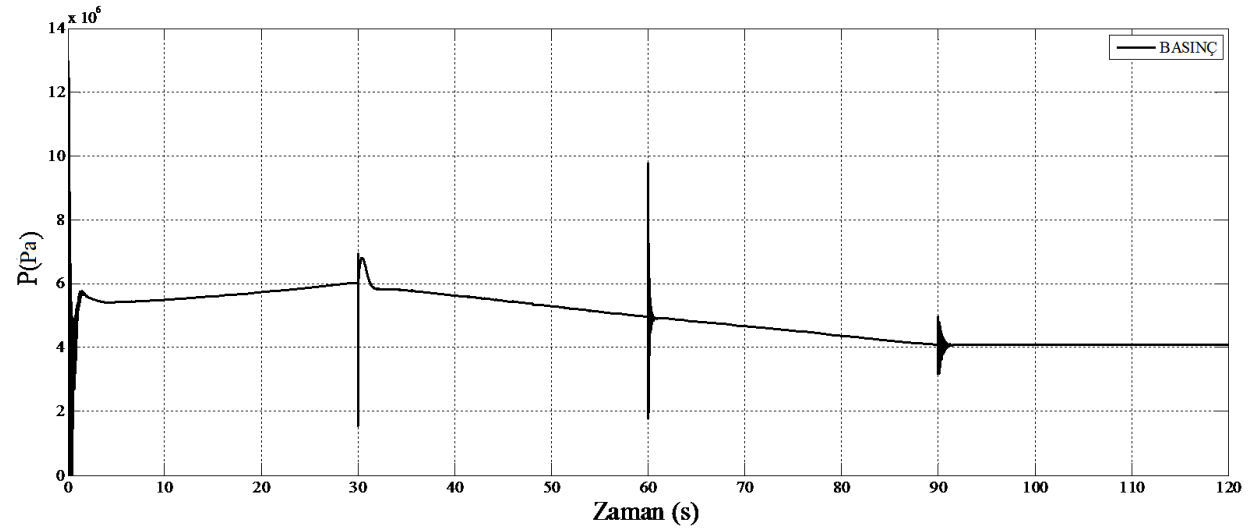
Şekil 5. Anabom kaldırma silindiri basınç değişimi (Anabom cylinder pressure change)

Anabom uzvunun hareketi boyunca kaldırma silindirine uygulanan basınç Şekil 5 te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere kaldırma silindirine uygulanan basınç sistem için gerekli olan çalışma basıncı sınırları içerisinde.



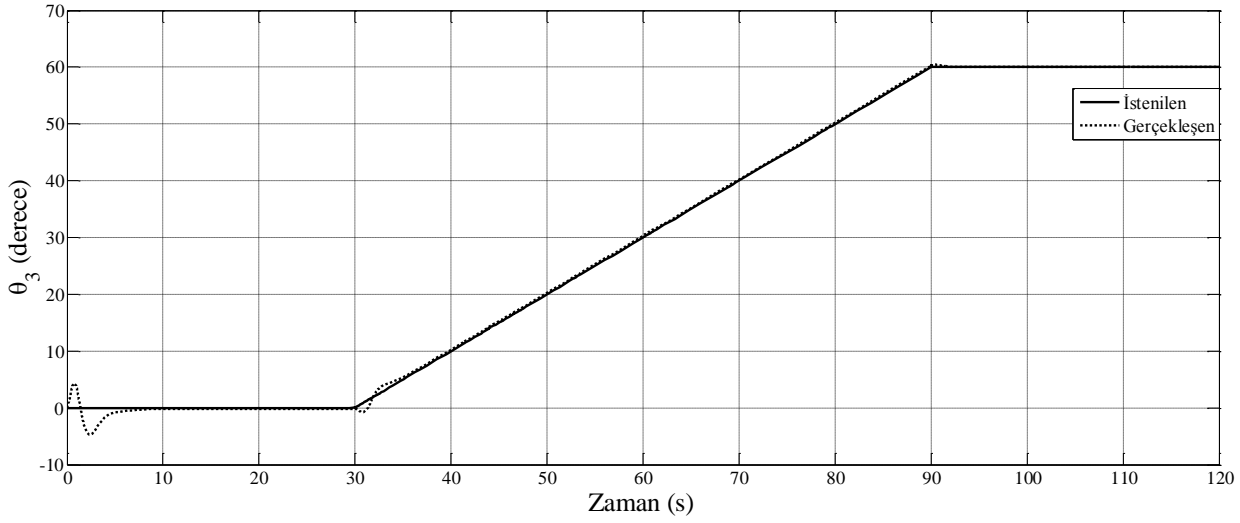
Şekil 6. θ_2 Kırmabom kalkma açısının PID kontrolcü uygulanarak karşılaştırılması
(Comparison of Kırmabom lifting angle analyzed using the PID Controller)

Şekil 6 incelendiğinde sistemdeki kırmabom uzvunun sisteme girilen ve PID kontrolcünden elde edilen sinyallerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Kırmabom uzvunun kontrolü bir adet PID kontrolcü ile sağlanmıştır. Kırmabom uzvu anabom uzvunun hareketi sırasında ilk 10 saniye kararsız bir davranış gözlenmektedir. 30-60 saniye arasında kırmabom uzvunun hareketi gerçekleşmektedir. Kırmabom uzvunun hareketi sırasında çok ufak sapmalar meydana gelmiştir fakat bu sapmalar kabul edilebilir seviyede olduğundan kırmabom uzvunun kontrolü gerçekleştirilmiş olarak kabul edilebilir.



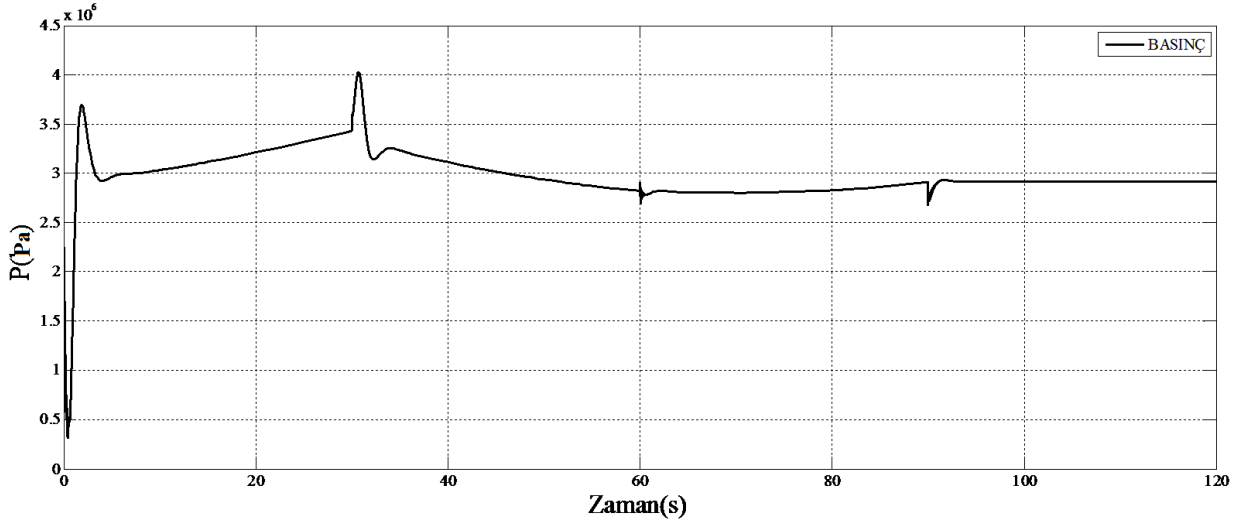
Şekil 7. Kırmabom silindiri basınç değişimi (Kırmabom cylinder pressure change)

Şekil 7 deki kırmabom basınç değişimi grafiğinde görüldüğü gibi 30., 60. ve 90. saniyelerde basınç değeri ani artış göstermektedir. Bunun sebebi 30. saniyede anabom, 60. saniyede kırmabom ve 30-90 saniyeleri arasında flybom hareketinin başlangıç zamanları olduğu içindir. Her uzvu hareketi diğer tüm uzuvları etkilediği için bu durum sistem çalışma basıncı dahilindedir.



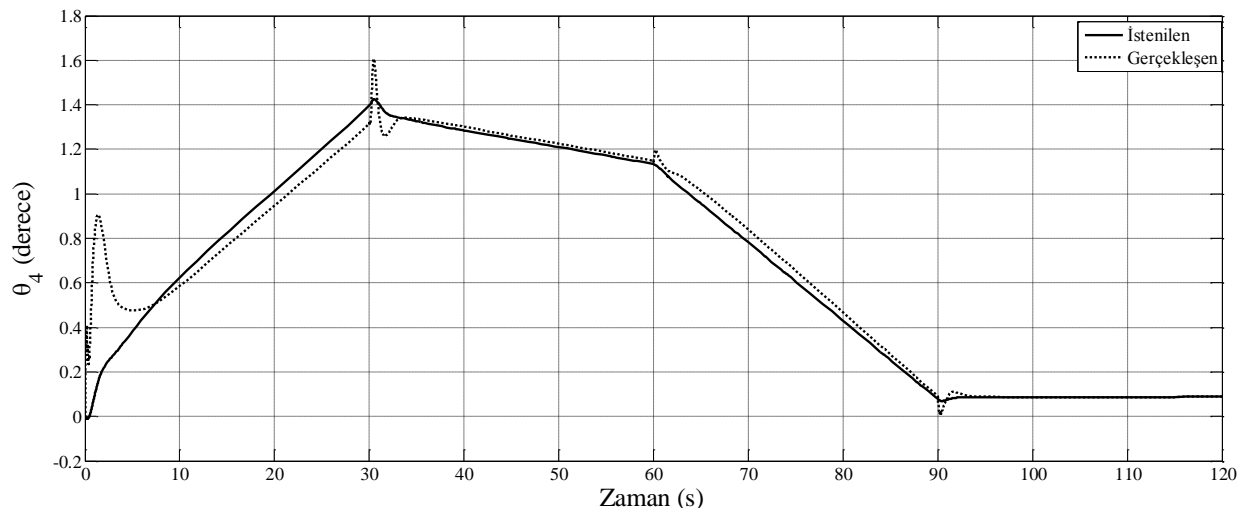
Şekil 8. θ_3 Flybom kalkma açısının PID kontrolcü uygulanarak karşılaştırılması
(Comparison of Flybom lifting angle analyzed using the PID Controller)

Şekil 8 incelendiğinde sistemdeki flybom uzvunun sisteme girilen ve elde edilen sinyallerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Flybom uzvunun kontrolü bir adet PID kontrolcü ile sağlanmıştır. Flybom uzvu anabom ve kırmabom uzuvlarının hareketleri sırasında sürekli kendini giriş sinyali doğrultusunda konumunu korumaya çalışılmış ve başarılı olunmuştur. 0-60 saniye arasında anabom ve kırmabom uzvunun hareketi gerçekleşmektedir. Flybom uzvunun hareketi sırasında çok ufak sapmalar meydana gelmiştir fakat bu sapmalar kabul edilebilir seviyede olduğundan flybom uzvunun kontrolü gerçekleştirilmiş olarak kabul edilebilir.



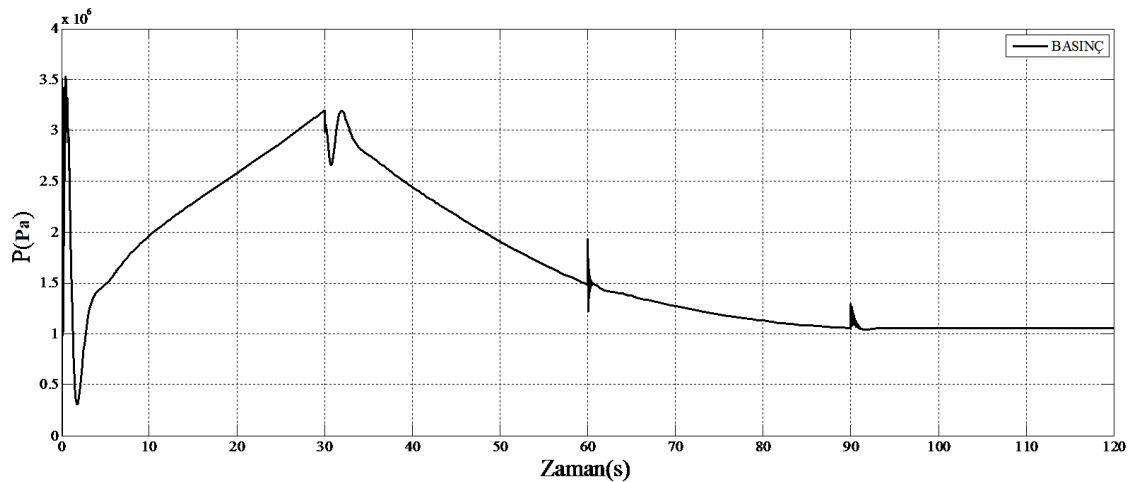
Şekil 9. Flybom silindiri basınç değişimi (Flybom cylinder pressure change)

Şekil 9 da flybom silindirinin basınç değişim grafiği görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi diğer uzuvların harekete başlama esnasında basınç değerleri ani artış ve azalmalar göstermektedir. Sistemin çalışma basıncı sınırları içerisinde.



Şekil 10. θ_4 Sepetbom kalkma açısının PID kontrolcü uygulanarak karşılaştırılması
(Comparison of Sepetbom lifting angle analyzed using the PID Controller)

Sepetbom uzvunun sitemdeki konumunu diğer uzuvların yaptıkları hareketler etkilemektedir. Sistemde verilen giriş sinyali diğer uzuvların hareketlerinin formülasyonu ile elde edilmiştir. Diğer uzuvların hareketleri sırasında sepetbomun yaptığı hareket ve uygulanan kontrolcünden sonra çıkış sinyali Şekil 10 da görülmektedir. Sistemde kullanılan PID kontrolcü 90-120 saniye aralarında kararlı bir durum gözlenmiştir. Sepetbom uzvunun 90-120 saniye arasında 0.008° olarak bulunmuştur. Çizelge 10 da verilen sepetbom uzvunun kısıtları içerisinde olduğu için sepetbom uzvu dengelenmiş olarak kabul edilebilir.



Şekil 11. Sepetbom silindiri basınç değişimi (Sepetbom cylinder pressure change)

Şekil 11 da sepetbom silindirinin basınç değişim grafiği görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi diğer uzuvların harekete başlama esnasında basınç değerleri ani artış göstermektedir. Sistemin çalışma basıncı dahilindedir.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan bu çalışma kapsamında ilk olarak fiziksel olan sistemin matematiksel ifadelerle elde edilmesi için Lagrange metodu ile matematiksel modeli oluşturulmuştur. Daha sonra sistemin çalışma kısıtları belirlenip sisteme verilecek olan giriş sinyalleri belirlenmiştir. Mobil Hidrolik İnsan Platformunun sepetbom uzvunun dengelenmesi için PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Belirlenen giriş sinyallerinin sisteme dahil edip uygulanan PID kontrolcü ile uzuvların çıkış sinyallerinin kontrolleri yapılmıştır. Sistemde ki uzuvların hareketlerine uygulanan ayrı ayrı PID kontrolcülerin sonucunda elde

edilen sistemde ki çıkış sinyalleri grafiksel olarak elde edilmiştir. Bu grafiklere göre tasarlanan PID kontrolcünün sistem üzerinde oldukça etkili olduğu ve tatmin edici sonuçlar verdiği kanısına varılmıştır. Fakat kullanılan kontrolcü tipi değiştirilerek sistemin performansı artırılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada sayısal uygulama yapılabilmesi için gerekli olan gerçek bir sisteme ait verilerin teminindeki katkı ve desteklerinden dolayı tüm HİDROKON çalışanlarına ve Genel Müdürü Memiş KÜTÜKCÜ 'ye teşekkür ederim. Bu makale Mehmet SEZER 'in yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hu H., Li E., Zhao X., Liang Z. and Yu W. ,“ Modeling and Simulation of Folding-Boom Aerial Platform Vehicle Based on the Flexible Multi-body Dynamics”, *International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, Dalian, China, 798-802, 13-15 August 2010.
- The History of the Cherry Picker Construction Equipment,
<http://www.elcaminoental.com/blog/the-history-of-the-cherry-picker-construction-equipment/>, ziyaret tarihi: 31 Mayıs 2014.
- Ming Ge, En Li, Zize Liang, Min Tan “Design of a Hydraulic-Cylinder-Pressure-based Anti-overturning Module for Aerial Work Platforms”, 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation
- Yuan Q., Lew J., Piyabongkarn D.,“ Motion Control of an Aerial Work Platform”, *2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront*, St. Louis, MO, USA, 10-12 June 2009.
- Hootsmans N.A.M., Dubowsky S., MO P.Z., “The Experimental Performance of a Mobile Manipulator Control Algorithm”, *Proceeding of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation Nice, France*, Cambridge, MA 02139 USA, 1948-1954, May 1992
- Murray, R.M., Li, Z., Sastry, S. S. , 1994, “A planar Example”, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRS Press, 97-99